

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 99 (1973)
Heft: 21

Artikel: Moteurs linéaires - Phénomènes d'attraction et de répulsion
Autor: Jufer, Marcel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-71704>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Moteurs linéaires — Phénomènes d'attraction et de répulsion¹

par MARCEL JUFER, professeur

1. Généralités

Le moteur linéaire, aussi bien de type asynchrone que synchrone, assure en premier lieu la génération d'un effort de translation par interaction entre une structure fixe et une structure mobile. Ce phénomène s'accompagne de divers effets parasites s'exerçant dans un plan perpendiculaire à la direction de propulsion. Entre autres, un effort apparaît généralement perpendiculairement à la surface active, entre inducteur et induit ou entre inducteurs dans le cas d'un système double. Cette force peut avoir deux origines :

- la perméabilité différente de celle de l'air de deux milieux intéressés par la circulation du flux ; un effort d'attraction en est la conséquence ;
- la présence de courants induits (moteur asynchrone) qui génère un effort de répulsion avec l'inducteur.

Ces deux phénomènes peuvent apparaître simultanément.

Selon l'application, ces effets secondaires peuvent prendre une grande importance quant à la structure de la liaison entre le moteur et l'organe entraîné. Les problèmes de guidage et de sustentation de l'élément mobile peuvent être fortement influencés par ces efforts. Dans certains cas, ils peuvent même être recherchés pour des applications de type lévitation, guidage ou aiguillage magnétique.

Dans une machine tournante, les mêmes phénomènes apparaissent également, mais leurs effets sont moins marqués par suite de la structure radiale. Seule une excentricité entraîne un effort résultant non nul, mais la rigidité des paliers est telle que cet effet est généralement sans conséquences. Cependant, la répartition sinusoïdale tournante du champ magnétique provoque une excitation mécanique du stator [2].

Pour un moteur linéaire, la résultante peut être non nulle quelle que soit la position (structure à un inducteur). Une excitation vibratoire de l'inducteur peut également exister. Divers paramètres influenceront l'intensité du phénomène d'attraction ou de répulsion :

- la nature des matériaux en présence,
- la structure de l'induit,
- la saturation (intensité des flux),
- le glissement,
- le type d'alimentation,
- les effets d'extrémités.

2. Méthodes de calcul

La méthode proposée est basée sur les relations de la référence [1], qui permet de calculer le comportement

¹ Texte d'une conférence présentée par la Chaire d'électromécanique de l'EPFL au Symposium sur les moteurs linéaires organisé à Capri du 19-21 juin 1973 par l'Institut d'électrotechnique de l'Université de Naples et l'Institut de Machines électriques de l'UT de Hannover.

d'un moteur linéaire en traitant l'espace entrefer-induit à trois dimensions. Les effets de bords et d'extrémités sont pris en considération par une technique de modulation. Le vecteur de Poynting permet de déterminer le flux de puissance au niveau de l'inducteur et de l'induit. Ces grandeurs, étendues à l'espace moteur permettent de déterminer la poussée.

Les grandeurs électromagnétiques (champs magnétique et électrique, densité de courant) étant connues dans tout l'espace moteur, deux méthodes permettent de déterminer l'effort d'interaction entre structures magnétiques. Considérons le cas particulier d'un moteur à un inducteur (fig. 1) :

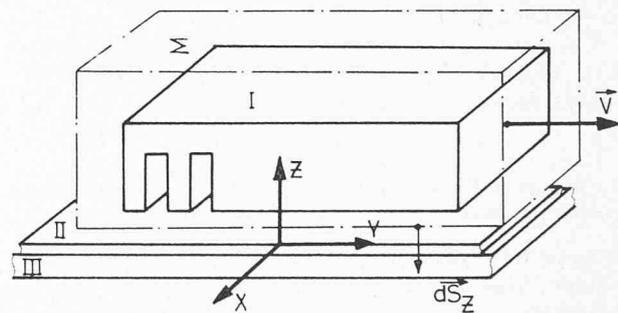


Fig. 1. — Moteur à un inducteur. I. Inducteur ; II. Induit ; III. Culasse d'induit.

- Soit W l'énergie magnétique totale interne au système moteur :

$$W = \iiint_V \frac{1}{2} B H dV = \iiint_V \frac{1}{2} (B_x H_x + B_y H_y + B_z H_z) dV$$

Il est également possible de déterminer cette énergie par l'intermédiaire du vecteur de Poynting (partie imaginaire).

La force d'interaction dans la direction z , entre inducteur et induit vaudra :

$$F = \frac{dW}{d\delta}$$

Elle sera fonction entre autres, de la vitesse.

- Le tenseur de Maxwell permet d'associer les grandeurs magnétiques directement à l'ensemble des forces s'exerçant sur un volume. Ce tenseur comprend trois composantes permettant de calculer les forces dans les

trois directions d'un système cartésien. Dans le cas particulier, seule la composante z nous intéresse :

$$\vec{T}_z = \left\{ \mu H_z H_x ; \mu H_z H_y ; \frac{1}{2} \mu (H_z^2 - H_x^2 - H_y^2) \right\}$$

La force F_z s'exerçant sur le volume V délimité par la surface Σ aura l'expression :

$$F_z = \iiint_V \operatorname{div} \vec{T}_z dV = \iint_{\Sigma} \vec{T}_z \cdot d\vec{\Sigma}$$

Dans le cas particulier du moteur linéaire à un inducteur (Fig. 1), on peut écrire en admettant un champ nul partout ailleurs que dans l'entrefer :

$$F_z = \iint_{\Sigma} \vec{T}_z \cdot d\vec{\Sigma} = \iint_S \vec{T}_z \cdot \vec{dS}_z = \iint_S \frac{1}{2} \mu_0 (H_z^2 - H_x^2 - H_y^2) dS$$

La méthode de la dérivation de l'énergie présente l'avantage de définir sans équivoque la force d'interaction entre deux éléments. L'interprétation de la notion de tenseur de Maxwell est plus délicate du point de vue force relative, mais en revanche plus simple du point de vue calcul.

Ces méthodes s'appliquent aussi bien au cas d'un moteur à un inducteur que pour le calcul de diverses forces intervenant dans un moteur à deux inducteurs.

3. Moteurs linéaires — Application à un système de traction

Le moteur linéaire ne peut pas être guidé, relativement à l'induit, aussi simplement que dans le cas d'une machine tournante. D'une part de bonnes performances en rendement exigent un entrefer le plus faible possible et d'autre part des forces d'interaction entre entrefer et induit peuvent avoir tendance à perturber le guidage. La connaissance des forces d'attraction ou de répulsion permet de satisfaire au mieux les exigences des systèmes du guidage ou de sustentation du système mobile. Nous verrons en effet que ces diverses forces peuvent être sujettes à de brusques variations.

Le comportement en alimentation alternative (propulsion) sera généralement différent de celui en alimentation continue (freinage).

Considérons tout d'abord le cas d'un moteur simple inducteur, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Puissance mécanique 75 kW à 15 m/s — 8 pôles, longueur 1600 mm, largeur 200 mm, hauteur 95 mm, induit de largeur 200 mm en aluminium, épaisseur 3 mm. Culasse magnétique en acier massif, épaisseur 18 mm.

Poids total de l'inducteur : 206 kg*.

En négligeant les effets d'extrémité, on obtient les forces d'interaction entre induit et moteur, qui correspondent à une répulsion pour les faibles vitesses et à une attraction au voisinage de la vitesse synchrone. L'épaisseur de l'induit est de 3 mm, mais constituée de matériaux variables (fig. 2).

Plus la résistivité est faible, plus la force de répulsion aux basses vitesses est importante. Pour le matériau prévu (aluminium), cette force atteint 1680 kg* à l'arrêt, soit

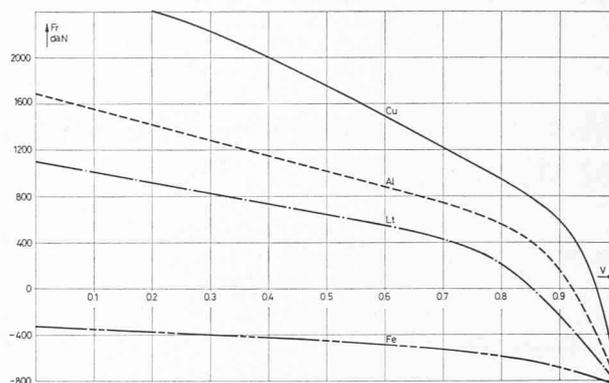


Fig. 2. — Force de répulsion en fonction de la vitesse. Alimentation à tension constante. Cu : cuivre 20 nΩm. Al : aluminium 48 nΩm. Lt : laiton 80 nΩm. Ac : acier 200 nΩm.

huit fois le poids propre du moteur. Au synchronisme, la force d'attraction est de 830 kg* (quatre fois le poids du moteur).

Pour un secondaire entièrement en acier, la réaction d'induit est insuffisante pour provoquer l'apparition d'une force de répulsion aux faibles vitesses. L'effort d'attraction est simplement réduit. Dans le cas particulier, la force d'attraction à glissement nul est comparable entre induit acier et induit amagnétique, par suite de la réduction du courant magnétisant pour l'acier.

La figure 3 donne les mêmes grandeurs, toujours sans effets d'extrémités, pour une alimentation à courant constant, correspondant au courant nominal pour un induit d'aluminium.

Si l'effort de répulsion est réduit, en revanche l'effort d'attraction au voisinage du synchronisme est considérablement accru.

Les figures 4 et 5 permettent la comparaison, pour un induit de 3 mm, entre une « tranche » de moteur théorique infiniment long et le même moteur, compte tenu des effets d'extrémité. Les alimentations respectives sont à tension et courant constants.

Les pertes liées aux courants induits d'extrémités provoquent une réduction de l'effort de répulsion aux faibles vitesses, mais également de l'effort d'attraction au voisinage du synchronisme. En revanche, l'effet est négligeable lors d'un freinage à courant continu. En particulier, à l'arrêt, pour un courant conduisant à un potentiel magnétique égal à celui créé par le courant nominal en alternatif triphasé, on obtient un effort d'attraction de 5323 kg*, soit 26 fois le poids du moteur. Ce dernier étant prévu pour propulser une charge de 8 tonnes, le freinage provoquera

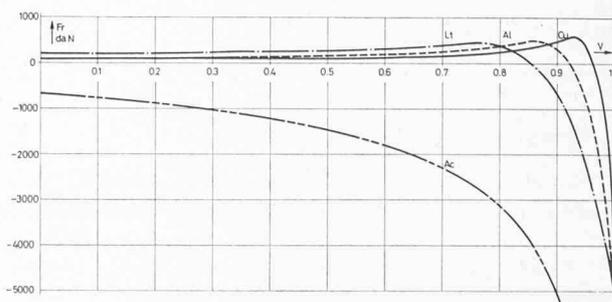


Fig. 3. — Force de répulsion en fonction de la vitesse. Alimentation à courant constant (symboles fig. 2).

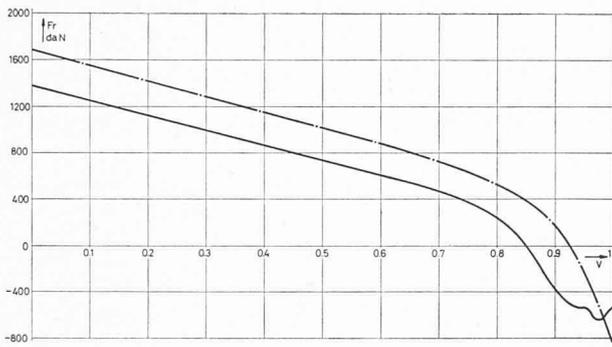


Fig. 4. — Force de répulsion en fonction de la vitesse. Alimentation à tension constante.
— sans effets d'extrémités,
- - - avec effets d'extrémités.

un brutal accroissement de l'ordre de 66 % de la charge. Selon le système de sustentation, une diminution d'entrefer s'ensuivra qui provoquera à son tour une augmentation de l'effort. Un système tel qu'un coussin d'air sera particulièrement sensible à un tel effet et exclut pratiquement le freinage par courant continu jusqu'à l'arrêt, avec un inducteur simple. Cet inconvénient peut être corrigé par un contrôle du flux dans l'entrefer. Des inconvénients peuvent également apparaître pour une sustentation par roues à pneus. Au contraire, l'effort de répulsion au démarrage aura tendance à soulager la charge de la sustentation et diminuera le coefficient de frottement.

Pour un moteur à deux inducteurs, une force d'interaction apparaîtra essentiellement entre les inducteurs, alors que l'effort entre inducteurs et induit est relativement faible et possède une tendance au centrage, pour un induit aimantique. La force entre inducteurs se reportera sur la structure de maintien de ces deux éléments, qu'il s'agira de dimensionner en conséquence.

Considérons un moteur présentant des caractéristiques proches du précédent, mais de puissance double (inducteur double), dont les principales caractéristiques sont :

- Puissance mécanique 150 kW à 15 m/s, 4 pôles, longueur 910 mm, hauteur 200 mm, largeur totale 248 mm. Induit de hauteur 320 mm, en aluminium, épaisseur 4 mm. Entrefer de 2 fois 5 mm. Poids total de l'inducteur 509 kg*.

La figure 6 représente les diverses caractéristiques d'attraction (répulsion) entre les deux inducteurs pour une alimentation à tension nominale constante, en fonction de la vitesse. Trois cas sont pris en considération par le calcul :

- Cas d'une « tranche » de moteur infini.
- Moteur de longueur limitée (effets d'extrémités).
- Moteur de longueur et hauteur limitées (effets d'extrémités et de bord).

Comme pour le cas d'un simple inducteur, on a une attraction au voisinage du synchronisme et une répulsion, par suite de la réaction d'induit, pour des glissements importants. L'effet d'extrémité atténue la répulsion au démarrage. L'effet de bord, par réduction du courant correspondant à la réaction d'induit atténuée encore la répulsion, ainsi que certains phénomènes harmoniques en hypersynchronisme.

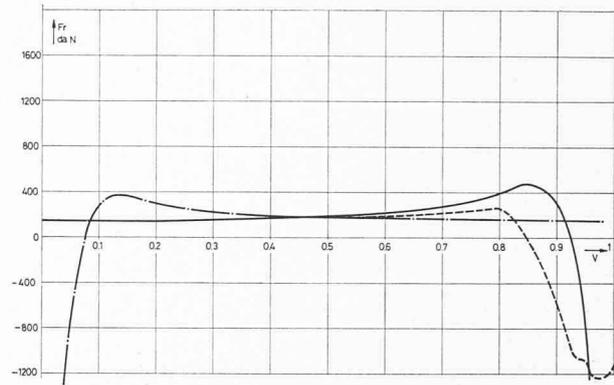


Fig. 5. — Force de répulsion en fonction de la vitesse. Alimentation à courant constant (I_N).
— sans effets d'extrémités,
- - - avec effets d'extrémités,
- . - effort au freinage à courant continu.

A trois dimensions, l'effort d'attraction maximum est de 700 kg* et celui de répulsion de 600 kg* au démarrage, soit des valeurs relativement peu importantes puisque comparables à celle du poids propre.

En alimentation à courant imposé nominal, on obtient les courbes de la figure 7 qui montre un accroissement de la force d'attraction au voisinage du synchronisme. Pour un freinage à courant continu (potentiel magnétique nominal), l'effort d'attraction à l'arrêt devient à nouveau considérable, puisqu'il atteint 6800 kg*. La structure devra pouvoir supporter cet effort.

Les mêmes méthodes permettent de déterminer l'effort d'interaction entre inducteurs et induit de ce même moteur, en fonction de l'excentricité des « entrefers ». Par la méthode des énergies, il est même possible de déterminer séparément les efforts entre chacun des inducteurs et l'induit. La figure 8 décrit les forces respectives F_A et F_B s'exerçant sur chacun des inducteurs, en fonction de l'entrefer δ_A entre l'inducteur A et l'induit.

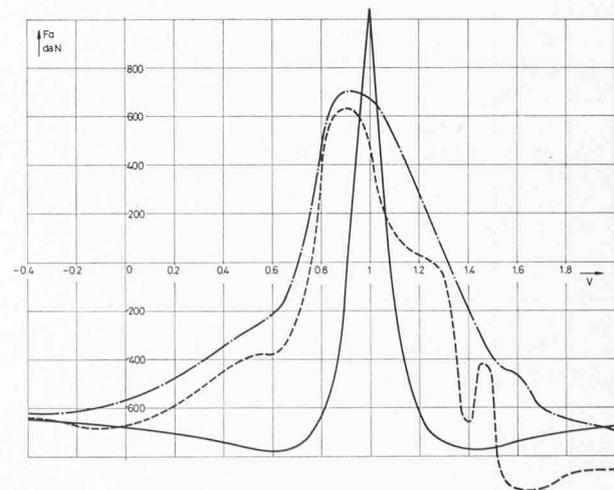


Fig. 6. — Force d'attraction entre inducteurs en fonction de la vitesse ; alimentation en tension.
- - - avec effets d'extrémités,
— cas infini,
- . - avec effets d'extrémités et de bord.

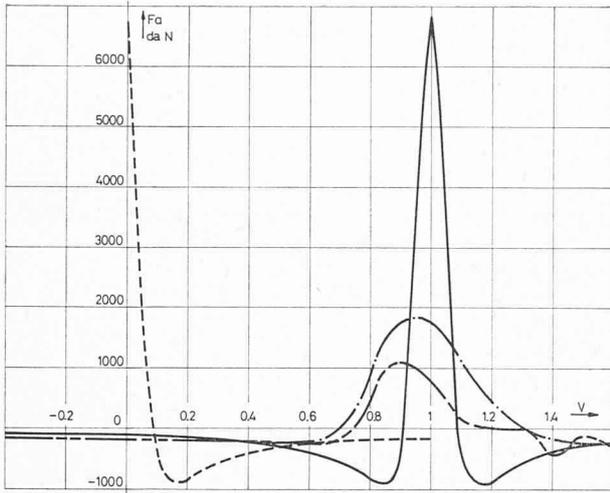


Fig. 7. — Force d'attraction entre inducteurs en fonction de la vitesse ; alimentation à courant constant.

- cas infini,
- - - freinage,
- · - · avec effets d'extrémités,
- · · avec effets de bord et d'extrémités.

La force résultante F correspond à un effet de centrage. Elle s'annule pour l'induit au centre des inducteurs ($\delta_A = \delta_B = 5 \text{ mm}$) et ce point définit une position stable. Le cas particulier correspond à une alimentation à courant nominal, à l'arrêt. L'effort maximum de centrage est de 230 kg^* pour un poids propre de 509 kg^* . Il est curieux de constater que pour l'induit collé contre un inducteur, il y a répulsion pour l'inducteur considéré et attraction pour l'autre (voir conventions fig. 8). L'écart entre les forces F_A et F_B , pratiquement constant, représente l'effort résultant entre inducteurs. On a une répulsion pour le point considéré (voir fig. 7).

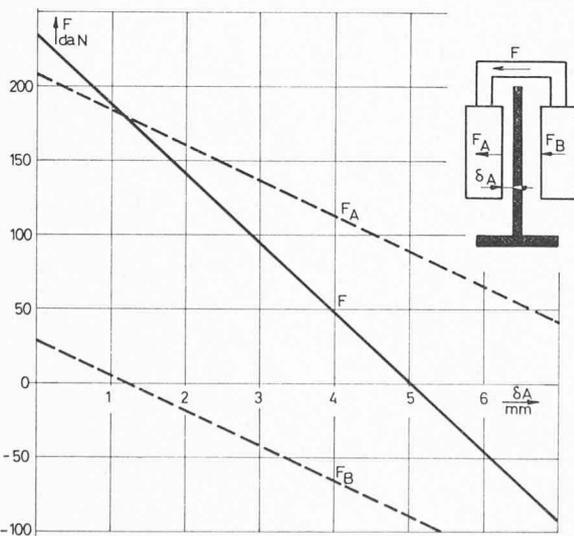


Fig. 8. — Forces s'exerçant entre inducteur double et induit, en cas d'excentricité.

- force résultante,
- - - forces partielles.

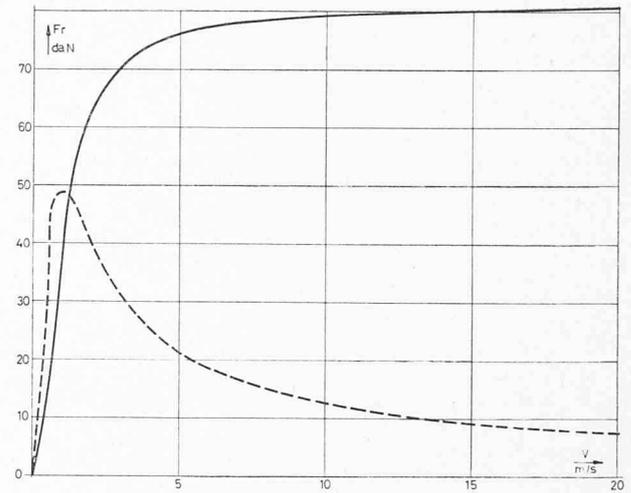


Fig. 9. — Système de lévitation à induction.

- force de répulsion,
- - - traînée (effort de freinage).

4. Applications particulières

4.1 Lévitation par répulsion

Le principe en est connu et décrit par plusieurs publications [3], [4], [5], etc. Des prototypes sont même réalisés, dans le domaine de la sustentation de véhicules terrestres à grandes vitesses (Japon, USA, Allemagne).

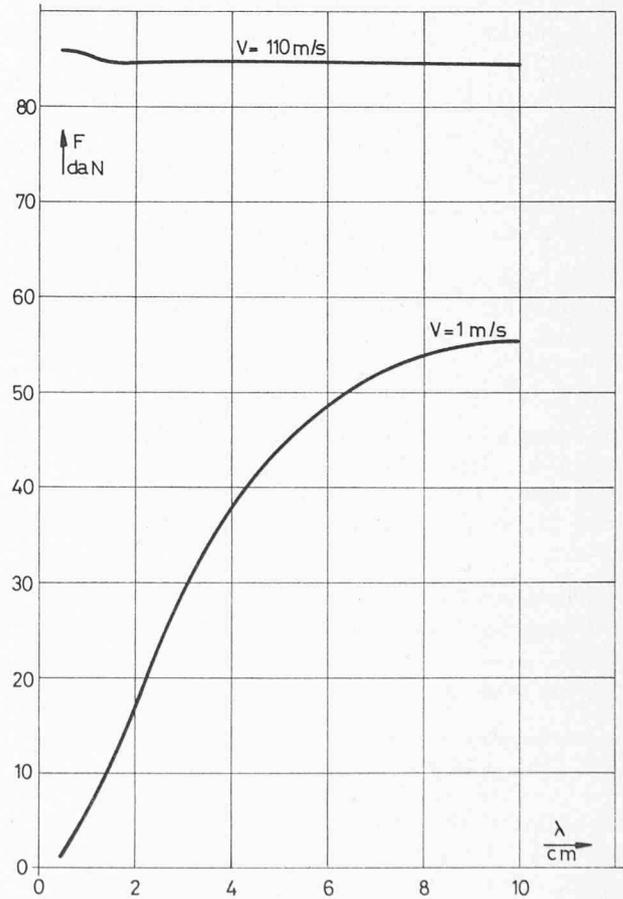


Fig. 10. — Force de répulsion en fonction de l'épaisseur d'induit.

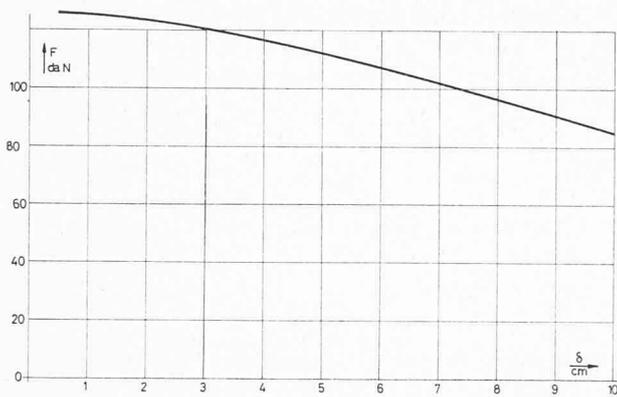


Fig. 11. — Force de répulsion en fonction de l'épaisseur de l'entrefer, à 110 m/s.

Considérons le cas où l'induit est constitué par un milieu conducteur homogène (il peut aussi être constitué de spires en court-circuit). La culasse ferromagnétique doit évidemment être supprimée, puisqu'elle introduit une composante d'attraction.

L'inducteur, excité par un bobinage à courant continu, crée un potentiel magnétique à distribution sinusoïdale ou non. Les équations spécifiques seront régies par les relations de Maxwell qui peuvent être intégrées par les méthodes de la réf. [1]. Si la distribution est non sinusoïdale, une technique de modulation spécifique doit être introduite.

Un inducteur a été dimensionné et présente les principales caractéristiques suivantes :

- Longueur et largeur : 1 m.
- Densité de courant des bobinages : 5 A/mm².
- Nombre de pôles : 2.
- Induit en aluminium.
- Résistivité : 42 nΩm.
- Épaisseur : 40 mm.
- Entrefer nominal : 100 mm.

La figure 9 décrit l'évolution de la force de répulsion, ainsi que de la traînée (effort de freinage) en fonction de la vitesse. Pour des valeurs supérieures à 20 m/s, l'effort de répulsion se stabilise, alors que l'effort de freinage décroît hyperboliquement (Puissance de freinage environ constante). A basse vitesse, on a simultanément une traînée importante et une lévitation peu importante. Le système ne devient intéressant qu'à partir de 10 m/s, compte tenu des paramètres choisis.

La figure 10 montre l'influence de l'épaisseur de l'induit sur l'effort de répulsion à deux vitesses, respectivement 1 m/s et 110 m/s. Cet effet est négligeable aux hautes vitesses, mais très important à basse vitesse. Il y aura lieu de faire varier ce paramètre au voisinage des zones d'arrêt. L'influence sur la traînée n'est pas à négliger.

La figure 11 donne l'évolution de l'effort de répulsion en fonction de l'épaisseur de l'entrefer, pour une vitesse de 110 m/s. L'influence est relativement peu marquée, par suite du pas polaire relativement important.

Compte tenu des dimensions de l'inducteur, l'effort de répulsion maximum obtenu de 85 kg* est extrêmement faible. Il est alors nécessaire de recourir à un système d'excitation supraconducteur pour obtenir des valeurs admissibles. Sur la base d'une densité normale de 50 A/m² en régime supraconducteur, les échelles de forces obtenues doivent être multipliées par un facteur 100.

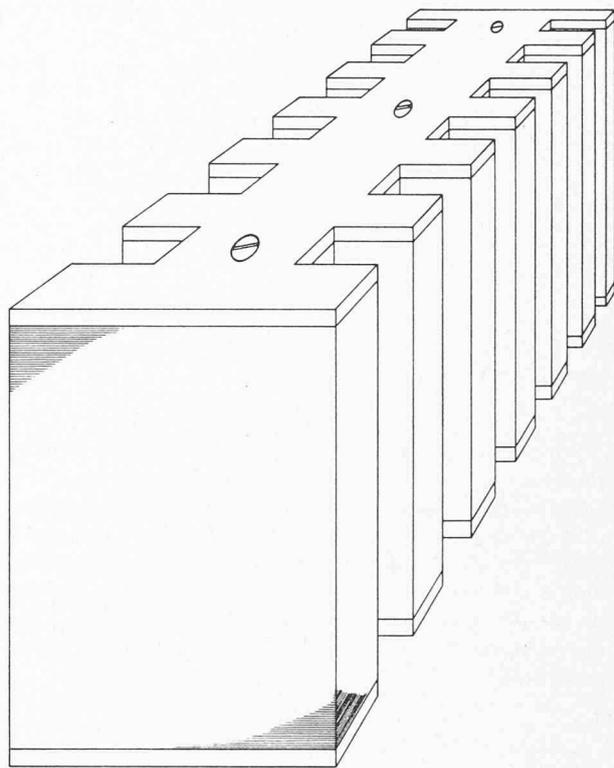


Fig. 12. — Empilage d'un moteur linéaire à double action.

4.2 Aiguillage magnétique

Considérons un moteur linéaire à inducteur double action, dont l'empilage, muni d'encoches de part et d'autre de l'axe de déplacement, définit deux surfaces actives (fig. 12).

Un tel moteur induira alors des courants dans deux induits simples situés de part et d'autre de l'inducteur (fig. 13).

Ces deux induits seront constitués d'un milieu conducteur et d'une culasse ferromagnétique. Dans la mesure où il y aura décentrage de l'inducteur relativement aux induits, un effort d'attraction ou de répulsion (selon le glissement) aura lieu entre ces éléments. Un guidage approprié permettra de maîtriser ces phénomènes.

Dans le cas d'un aiguillage, il est possible de profiter de ces effets d'attraction magnétique pour réaliser le choix d'une direction.

En effet, si un électro-aimant externe (A, B, fig. 14) permet d'introduire une dissymétrie dans les efforts d'attraction, on impose un choix entre les deux branches de la voie.

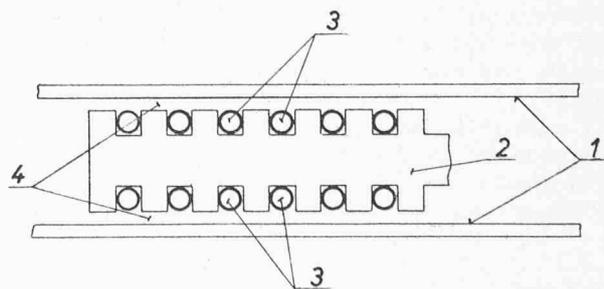


Fig. 13. — Coupe d'un moteur à double action : 1 induits, 2 inducteur, 3 bobinage.

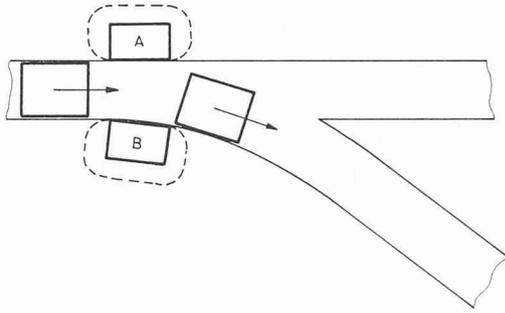


Fig. 14. — Aiguillage d'un moteur double action. A, B électroaimants de contrôle.

Le virage étant amorcé (ou la ligne droite imposée), le processus se poursuit sous l'effet de la différence des entrefers apparaissant dans la zone centrale de l'aiguillage.

Un tel comportement ne peut se produire que si le moteur travaille dans un domaine de forces d'attraction relativement aux induits. La réalisation d'une structure satisfaisant à ces conditions est indispensable. Pour ce faire, une méthode de calcul précise de ces phénomènes est primordiale.

Moteur linéaire à induction Effets d'extrémités conséquences et améliorations¹

par NICOLAS WAVRE

1. Introduction

Le moteur linéaire à induction est caractérisé par trois effets qui sont liés à sa géométrie :

- l'effet pelliculaire dans un induit massif ;
- l'effet de bord dû à la limitation transversale ;
- l'effet d'extrémités dû à la limitation longitudinale.

Les deux premiers sont déjà connus des moteurs asynchrones à rotor massif. Le troisième, propre au moteur linéaire, est le plus important et le plus délicat à calculer. Des méthodes de « modulation » [1] utilisant des séries de Fourier permettent d'exprimer de façon continue les grandeurs électromagnétiques de l'entrefer et de l'induit et de satisfaire les équations de Maxwell, compte tenu de la géométrie. Le calcul du vecteur de Poynting donnant le flux de puissance traversant l'entrefer et l'induit permet de calculer la poussée et d'établir un schéma équivalent. Il est possible de calculer les caractéristiques d'un moteur linéaire compte tenu simultanément des effets pelliculaires, de bord et d'extrémités (fig. 2) ou séparément ce qui permet une mise en évidence de l'importance de chacun d'eux (fig. 1).

Comparativement, on constate que l'effet d'extrémités provoque de grandes distorsions qui peuvent devenir inadmissibles au niveau du rendement. La figure 2 donne les caractéristiques globales d'un moteur ayant un bobinage

¹ Texte d'une conférence présentée par la Chaire d'électromécanique de l'EPFL au Symposium sur les moteurs linéaires organisé à Capri du 19-21 juin 1973 par l'Institut d'électrotechnique de l'Université de Naples et l'Institut de Machines électriques de l'UT de Hannover.

La construction d'un prototype de ce système d'aiguillage, équipé de moteurs 3 kVA à 2 m/s, a été entreprise dans nos laboratoires. La réalisation, à buts de manutention, donne entière satisfaction.

Adresse de l'auteur :

Marcel Jufer, chaire d'électromécanique de l'EPFL
22, ch. de Bellerive, 1007 Lausanne

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. JUFER, N. WAVRE : *Le moteur linéaire — Développement théorique et applications*. Bull. ASE 63 (1972) 15, p. 844-856.
- [2] H. JORDAN : *Geräuscharme Elektromotoren*. Verlag W. Girardet, Essen.
- [3] J. T. HARDING : *Progress in Magnetic Suspension Applied To High Speed Ground Transportation*. Us DOT, 1971.
- [4] P. J. GEARY : *Magnetic and electric Suspensions*. British Scientific Instrument Research Association, R 314 - 1964.
- [5] P. MARK BUNTING : *Magnetic Suspension for Guided Transport Vehicles*. Transportation Planning and Technology, 1972, 1, p. 49-74.
- [6] M. JUFER : *Détermination des caractéristiques spécifiques du moteur linéaire*. RGE, 80, n° 2, 1971, p. 105-113.

classique à deux encoches par pôle et phase. Le rendement ne dépasse pas 53 % et l'effet d'extrémités est particulièrement important au voisinage du synchronisme ainsi que pendant la marche en générateur. Par rapport au moteur linéaire idéal considéré comme une tranche de moteur infini dans les directions longitudinale et transversale [1], on observe les distorsions suivantes :

- baisse importante du rendement maximum ;
- la poussée s'annule en régime hyposynchrone ;
- le $\cos\phi$ ne devient négatif qu'en régime hypersynchrone.

Entre la marche en moteur et la marche en générateur, on trouve une zone de fonctionnement où le moteur devient consommateur non seulement d'énergie électrique mais également d'énergie mécanique. Aux pertes près dans les enroulements inducteurs, la totalité de cette énergie est dissipée dans l'induit. Cette zone de fonctionnement pratiquement inévitable doit impérativement être réduite au minimum admissible par des moyens que nous verrons plus loin.

En conséquence, on constate le peu d'importance de l'effet de bord eu égard à l'effet d'extrémités ce qui justifie une étude spécifique de ce dernier en faisant abstraction de l'effet de bord. A titre d'exemple, une récente mesure dans nos laboratoires a donné le résultat de la figure 3.

On constate que l'effet de bord a peu d'influence sur la poussée, seule l'impédance résultante du moteur varie de façon importante. Le maximum de la poussée apparaît pour une hauteur d'induit de 20 % supérieure à la hauteur des inducteurs. Un induit plus grand n'apporte rien de plus.